高性能大容量交流可変速駆動システム と圧延主機への応用

正員 中川輝夫 (東芝)

1. はじめに

交流可変速駆動システムは主回路素子の進歩、制御理論の発展およびマイクロコンピュータの普及と相まって制御の高度化が図られ、各分野で急速に実用化が広がっている。従来直流機が使用されていた鉄鋼を始めとする一般産業分野にて交流システムが採用され、省保守、高効率、小形化、高速化、制御の高度化が図られている^{(1)~(3)}。特に製鉄工業における圧延機の駆動システムは高度な可変速制御性とかこくな使用条件が要求されるが、従来の直流駆動システムでは直流機の整流の制約から実現が不可能であった特性も交流駆動システムでは実現できるようになった。本論文では最近開発実用化された高性能大容量交流可変速駆動システムの次の三機種について述べている。

(1) 一方向高中速機用途としてサイリスタモータによる同期電動機駆動システム。

(2) 可逆低速機用途として非循環電流サイクロコンバータによるかご形誘導電動機駆動システム。

(3) 可逆高中速機用途として循環電流サイクロコンバータによるかご形誘導電動機駆動システム。

いずれもマイクロコンピュータを用いた全デジタル制御を実現しており、(1)項は線材圧延プラントのブロックミルに適用された。(2)、(3)項はベクトル制御、現代制御など関連技術の進歩に伴い高性能化、高速応答化が達成され、(2)項は熱間圧延可逆主機に適用された。(3)項は各種圧延プラントの中で最も高度な性能を必要とする連続冷間圧延機、およびテンションリール駆動に応用された。

2. 各システムの特性

表1に圧延主機用可変速ドライブとして、最近開発

High Performance, Large Capacity AC Variable-Speed Motor Drive Systemes and Their Applications to Metal Rolling Mills.
By Teruo Nakagawa, Member (Toshiba Corporation).
中川輝夫: 正員, (株)東芝 府中工場

実用化された三機種の交流システムについて単線結線図、電動機、変換器、制御特性および特長について現状の直流システムと対比して示した。この三機種の実用化により、あらゆる用途の圧延主機に対し交流システムの適用が可能になった。

圧延機から要求される特性はいろいろあり、交流システムの適用にあたっては、各システムの特性と経済性を検討して最適なシステムを選定する必要がある。例えば、一方向圧延の線材ブロックミルでは電動機には高速、小形化が、性能では速度精度 $\pm 0.1\%$ 以上、速度応答 $\omega_e=20\sim 30$ rad/sが要求され、このような用途にはサイリスタモータが最適である。可逆圧延機の電動機には低速高トルク、低 GD^2 化が、また性能面では急速加減速特性として0-TOP加速時間2~3 s以下、速度応答 $\omega_e=20\sim 30$ rad/s、インパクト負荷に対する速い回復特性が要求される。このような用途には非循環電流サイクロコンバータが最適である。他方、最近の連続冷間圧延機では高生産性、高品質製品の生産目的から、従来の直流システムでは対応不可能な特性が駆動システムに要求されるようになってきた。速度特性では応答 $\omega_e=50\sim 60$ rad/s、精度 $\pm 0.01\%$ 、速度範囲は零速度から1,500 rpmくらいまでの高速回転、ストールトルク、定出力範囲1:6の広い界磁弱めが要求されている。このような用途に循環電流サイクロコンバータを開発した。

3. 高性能化技術と圧延主機への応用

表1に示した交流システムの諸特性を実現するために駆使された各種高性能化技術と各駆動システムの圧延主機への応用例を述べる。

〈3.1〉サイリスタモータ

(1) 高性能化技術 表1では12パルスの多相化システムを示した。サイリスタモータを圧延機駆動に適用するには、電機子反作用を補償して過負荷耐量の増大、定出力範囲の拡大、高速応答化、低トルクリ

表 1 各種圧延主機用可変速ドライブシステムの比較

Table 1. Comparison of various kinds of variable speed drive systems for metal rolling mills.

	直流レオナード	サイリスタモータ	非循環電流サイクロコンバータ	循環電流サイクロコンバータ
単線結線図				
電動機	直流電動機 容量・界磁範囲、速度により 複数電動機もしくは双電機子 になる。	回転界磁形同期電動機 シングルモータ	かご形誘導電動機 シングルモータ	かご形誘導電動機 シングルモータ
端子電圧	整流子及び刷りあり DC750~1200V	界磁刷りあり AC3300V	なし AC3300V	なし AC3300V
許容最大回転数	600 ~ 900 rpm	1800 rpm	600 rpm	1500 rpm
変換器	電源転流サイリスタコンバータ	電源転流サイリスタコンバータ + 負荷転流サイリスタインバータ	電源転流サイリスタコンバータ	電源転流サイリスタコンバータ
正逆切換	逆並列非連続	—	逆並列非連続	循環電流連続
出力電流	直流	—	正弦波	正弦波
最高周波数	—	60Hz	電源周波数の 1/3~1/2	電源周波数の約 5/6
制御装置	電機子電圧制御 全デジタル制御	自制式制御 全デジタル制御	すべり周波数式ベクトル制御 全デジタル制御	すべり周波数式ベクトル制御 全デジタル制御
速度制御精度	±0.01%	±0.01%	±0.01%	±0.01%
速度制御範囲	0~100% 零速度運転も可 (但し、電動機へパルスに注意)	3~100%	0~100% 零速度運転も可	0~100% 零速度運転も可
速度制御応答	30 rad/s	30 rad/s	30 rad/s	60 rad/s
界磁制御レンジ (最大)	通常 1:3 程度	1:3	1:3	1:6
出力特性			右図と同じ	
トルクリップル (f_o : 出力周波数 f_s : 電源周波数)	6nfo分 0% 6nfs分 約 6% (360Hz)	12nfo分 約 5% (断続転流時、交互転流方式 採用により 2% 弱迄改善可能)	6nfo分 約 0.2~2% (18Hz)(180Hz) 6nfs分 約 5~6% (360~720Hz)	6nfo分 約 0% 6nfs分 約 1~2% (720Hz)
電源力率	約 75%	約 75%	約 60~65%	80~100%
電源高調波	6nfs ± 1 次の高調波あり	12nfs ± 1 次の高調波あり	6nfs ± 1 次及びその側帯波 高調波あり	12nfs ± 1 次及びその側帯波 高調波あり
特長	<ul style="list-style-type: none"> 多数の実績あり トルク制御が容易 複数電動機もしくは双電機子になり設置面積が大 HSCBなどの保護機器を必要とし、主回路複雑 効率がACに較べ低い 	<ul style="list-style-type: none"> 高速化が容易 主回路がシンプル 力率、高調波が直流システムと同じ トルクリップルがやや大きい 低速範囲のトルク特性に留意 	<ul style="list-style-type: none"> トルクリップルが非常に小さい 主回路がシンプル 速度制御応答を比較的速くできる 出力周波数が低い 電源力率が低い 	<ul style="list-style-type: none"> 有害なトルクリップルを含有しない (直流システムと同じ) 高速回転が可能 電源力率 1 が可能 速度制御応答が速い 主回路保護機器不要 変圧器、変換器が複雑で大きい

プル化が課題であった。これに対して転流余裕角 γ の最適制御、電気的な磁極位置検出器、電機子反作用補

償制御などを開発して課題を解決し適用可能にした。

(a) 転流余裕角 γ の最適制御 サイリスタモータ

タの力率、効率は制御進み角 β に依存しているため、転流余裕角 γ を最適にするように β を制御して電動機力率をベース速度にて 90% 以上に向上し電動機寸法の縮小、変換器容量の低減、低トルクリプル化を図った。演算の高精度化と (b) 項に述べる電気的位置検出器との組合せでこの制御が構成され、 γ は定格運転時に電気角で約 15 度の最適値に制御されている。

(b) 電気的位置検出器 (OPS) 同期電動機の磁極位置を検出する方法として従来の機械的検出器に対し、電動機の端子電圧から主磁束と電機子反作用による合成磁束の位置を検出する電気的検出器を開発実用化した。これにより位置検出精度を電気角で ± 0.2 度以下に向上し γ の最適制御を実現した。

(c) 電機子反作用補償制御 電機子電流による反作用磁束と主磁束の合成磁束の変化を抑制するように、界磁電流の速応制御 ($\omega_c = 100 \text{ rad/s}$) による合成補償方式を開発して 175% の過負荷耐量と定出力範囲 1:3 を実現し、速度応答 $\omega_c = 30 \text{ rad/s}$ を達成した。

(2) 圧延主機への応用 適用例としては線材プラントのブロックミルの駆動が多く、電動機定格

4 P-6, 000 kW-800/1, 400 rpm-46.7 Hz 2, 450/

2, 700 V-1, 660/1, 640 A-OL 175%

4 P-4, 800 kW-700/1, 750 rpm-58.3 Hz-2, 550/

3, 200 V-1, 270/1, 160 A-OL 175%

4 P-5, 000 kW-970/1, 350 rpm-45 Hz-2, 500/

2, 700 V-1, 356/1, 372 A-OL 150%

4 P-6, 300 kW-850/1, 750 rpm-58.3 Hz-2, 700/

3, 400 V-1, 635/1, 405 A-OL 175%

などがある。6, 300 kW 用変換器にはサイリスタ素子定格 4 kV-1.5 kA を使用し、一つのブリッジは 4 S $\times$ 1 P $\times$ 6 A で 2 バンクから構成している。

直流機は kW $\times$ 回転数で示される製作限界が (2~4) $\times 10^6$ kW $\cdot$ rpm であり、上記はいずれも電機子一組では製作できず寸法が大きくなるが、同期機ではこの限界が直流機より 2 けた程度高いので電機子一組で製作でき 6, 000 kW の例では全長が直流機より約 1/2 に小形化できた⁽⁴⁾。

〈3・2〉非循環電流サイクロコンバータ

(1) 高性能化技術 表 1 には変換器二段縦続接続の 12 パルス式を示した。このシステムで大容量可逆圧延主機を駆動する場合、電源システムの力率向上、高調波低減、出力周波数の拡大が課題であった。この解決のために力率改善制御、高調波低減制御、逆並列の正逆変換器の高速切換技術などを開発実用化した。

(a) 力率改善制御 二段縦続接続の各変換器の一方を最大出力電圧に固定、他方の変換器の出力電圧

を制御しこの動作を交互に行う非対称制御と、出力周波数の 3 倍調波のバイアス信号を重畳する AC バイアス制御の並用により、電源電圧を有効に利用し出力線間電圧を正弦波に保つと共に電源力率を約 65% に改善した。

(b) 高調波低減制御 サイクロコンバータでは入力電流の高調波周波数 f_H は電源周波数 f_1 と出力周波数 f_0 の関数となり次式で表される。

$$f_H = P f_1 \pm q f_0$$

p, q : 主回路構成によって決まる正整数

可変速駆動用のサイクロコンバータでは f_0 が変化するので f_H も変化し種々の高調波を発生する。このため全運転範囲における f_H とその高調波が電源システムに及ぼす影響をシステム計画時に検討して、電源システムに問題となる高調波成分を低減する必要がある。低減制御方法としてサイクロコンバータが本来発生する高調波に対し、それと逆位相の補償高調波を点弧角の変調により発生させ、両者で打消す制御を行う方法を開発した。 $f_H = 5 f_1 - 9 f_0$ の場合、高調波電流成分 4.5% から 0.7% への低減効果を得た。

(c) 正逆高速切換え 非循環電流サイクロコンバータでは正逆変換器の切換えを安全確実に高速で行い、トルクリプルの低減と運転周波数の拡大を図ることが課題であった。これに対し、正逆変換器の電流切換条件を高速デジタルサンプリングにより判断して、切換時間 1 ms 以下の高速切換えを実現した。この結果、圧延主機への実用上影響のない低トルクリプルにて運転周波数を電源周波数の 1/3 から 1/2 までに拡大した。

(2) 圧延主機への応用⁽⁵⁾ 適用例としては、パイピアサミル、厚板可逆仕上ミル、熱間可逆粗ミルなどがある。

電動機定格は

2 台 $\times$ 6 P-3, 000 kW-188/300 rpm-9.6/15.3 Hz-

2, 700/2, 770 V-780/742 A-OL 200%

2 台 $\times$ 16 P-7, 500 kW-50/100 rpm-6.9/13.7 Hz-

2.7/2.8 kV-2, 005/1, 807 A-OL 225%

4 P-8, 500 kW-450 rpm-15.1 Hz-3.3 kV-1, 680 A-

OL 225% OL: 過負荷耐量

である。変換器はサイリスタ素子定格 4 kV-1.5 kA を使用し、8, 500 kW 用は 2 個並列の 72 アーム構成にて出力電圧は 3.3 kV、定格電流 1, 680 A である。

堅牢でショックトルクに強い誘導機は小形化が可能で、既設 5, 000 kW の直流機の基礎へ 7, 500 kW の誘導機が置換できた⁽⁶⁾。

図 1 に 8, 500 kW 機の急速加減速運転のデータを

図 1 加減速運転特性

Fig. 1. Characteristics of acceleration and deceleration.

示す。0→TOP の加速時間は約 1.7 s である。

〈3・3〉 循環電流サイクロコンバータ

(1) 高性能化技術 表 1 には変換器二組の縦続接続 12 パルス式を示した。このシステムの技術課題は、さきに述べたような最高度の要求運転特性の実現と電源力率の向上であった。これらの課題に対し、ベクトル制御、電流制御の高速・高度化、無効電力一定制御、非干渉制御などの新技術を駆使して新システムを開発し適用可能にした。

また、従来から圧延主機では機械系の軸振動を抑制する制御の開発が大きな課題であった。これに対して有効な振動抑制制御方式を開発実用化した。

以下に回路構成とその制御技術について述べる。

図 2 システム構成図 (1 相分)

Fig. 2. System configuration (Single phase).

図 2 は 12 パルス式の 1 相分のシステム構成を示す。負荷に流れる電流 i_L は正群コンバータの出力電圧 V_P と、負群コンバータの出力電圧 V_N の平均値を変えて制御し、循環電流は V_P と V_N の差電圧を変えて制御する。また無効電力は循環電流を変えて制御⁽⁷⁾し、受電端の進相コンデンサと組合せてサイクロコンバータの運転周波数や負荷の変化にかかわらず電源系統の基本電力率を向上するようにしている。

図 3 は制御ブロックを示し、速度制御、磁束制御、ベクトル制御、電流制御、位相制御などから構成し、すべてディジタル化した。

ベクトルフィルタ部は高調波を含んだ三相正弦波電圧、電流を PLL 制御を用いて基本波正弦波電圧、電流成分を検出する機能と、基本波信号を三相/二相変換する機能から構成している。

(a) 全ディジタル制御の高速化 制御を高性能化、高度化するためには全ディジタル制御で、かつ高速化することが課題となる。このため 16 ビットマイクロプロセッサ μ -80186 を複数個用いメモリを共有化して処理速度の向上を図った。図 4 は制御を分散化して処理するこのシステムの制御フローチャートである。

(b) 速度制御の高精度化と高速応化 速度の精度と応答は制御の分解能、制御サンプリング時間、速度センサの精度と分解能、トルク制御の応答によって左右され、技術的には速度センサが最も重要である。このため、新しくブラシレスレゾルバ式高性能ディジタル速度検出器を開発した。その分解能は $4 \times 2^{16} = 262,144$ パルス/回転 である。特にレゾルバは位置検出形であるため零速度制御を含め極低速を必要とする制御のセンサとして優れている。これらの新技術の開発により制御の分解能 0.004%、速度応答 $\omega_c = 60$ rad/s を実現した。

(c) ベクトル制御 図 5 に磁束検出器を必要としないすべり周波数制御形のベクトル制御のブロック図を示す。磁束成分基準 I_{d*} は、磁気飽和やトルク電流基準 I_{d*} に対する応答遅れを考慮して二次磁束指令 ϕ_2^* から計算している。また、電動機二次抵抗の温度変化を正確に把握することによってこれを補償し、更に d 軸、 q 軸の二成分が誘導機内部の相互誘導のために、互いに他方の成分に影響を及ぼすのを補償する非干渉制御を適用して、安定で応答性の速い磁束制御とトルク制御を実現した。これらにより定出力範囲 1:6、トルク制御精度は 2% 以下を達成した。

(d) 電流制御の高速応化 速度応答を速くするにはマイナーループの電流制御を高速応化し、トルクの制御性を良くする必要がある。このために三相出力

Fig. 3. Control block diagram.

Fig. 5. Block diagram of vector control.

電流を二相変換し、 d 軸、 q 軸各成分としてフィードバックし、ベクトル制御出力である電流指令 I_{d}^* 、 I_{q}^* と比較する。電流制御は 1 ms の高速サンプリングにより実行し、電流応答 $\omega_c = 600\text{ rad/s}$ 以上を実現した。

(e) 非干渉循環電流制御　循環電流サイクロコンバータでは、循環電流回路と負荷電流回路が直流リアクトルを共有しているので、両制御回路の相互干渉が起こる。このため非干渉制御理論⁽⁸⁾を適用し、両方

Fig. 4. Control flow chart.

図 6 SFC ブロック図

Fig. 6. Block diagram of SFC.

図 7 加減速運転 (SFC 付)

Fig. 7. Characteristics of acceleration and deceleration with SFC.

の制御系間の相互干渉を抑制して、無効電力制御がベクトル制御に影響を及ぼさないシステムを実現した。

(f) シミュレータ追従制御 (SFC) 大きなインパクト負荷のかかる圧延機では、インパクト負荷時の速度変動を小さく、回復時間を短くすることが要求される。この負荷応答を速くするには、速度指令応答を速くする必要があるが、圧延機では機械系の軸振動があり、制御系が振動を助長しないように応答向上が制約されていた。そこで SFC (Simulator Following Control) を開発して軸振動を抑制し、速度応答の向上と負荷応答の改善を実現した。

図 6 に SFC のブロック図を示す。トルク電流制御系のシミュレータと負荷の GD^2 シミュレータから

図 8 速度制御精度

Fig. 8. Accuracy of speed control.

構成し、電動機のシミュレーション速度 $\hat{N}$ を求め、速度フィードバック N_f との偏差に補償伝達関数 $G_x(s)$ を作用させ、外乱補償トルク電流指令 I_a^* を得てトルク制御系により軸振動を抑制するようにしている。

(2) 運転特性 実機規模の試験機を作って性能検証をした結果について述べる。試験機は誘導機 (定格 4 P-200 kW-200/1, 200 rpm-6.94/41.6 Hz-375/429 V-384/345 A-OL 175%), 負荷として直流機 (定格 1, 000 kW-1, 200 rpm) を備え、その間をねじり振動周波数 20 Hz の軸で結合して、圧延機系を模擬し SFC の効果を確認できるようにした。サイクロコンバータは 12 パルス式 72 アーム構成である。

図 9 速度ステップ応答 (14%→14.5%, SFC なし)

Fig. 9. Step-speed response without SFC.

図 10 速度ステップ応答 (14%→14.5%, SFC 付)

Fig. 10. Step-speed response with SFC.

図 11 トルク制御特性

Fig. 11. Torque characteristic.

図 7 は加減速運転特性であり定格速度 1,200 rpm, 界磁弱め制御範囲 1:6 にて良好な加減速特性を示している。図 8 は零速度制御と 0.1%, 0.2% 速度にて速度制御精度 0.01% を確認したデータである。

図 9 は SFC なしの場合の速度ステップ応答を示し、軸トルクがねじり振動周波数で振動して減衰時間が長い。これに対し、図 10 の SFC ありの場合の速度ステップ応答では、振動現象が抑制されており SFC の効果を検証できた。この場合の速度応答は $\omega_e = 60$ rad/s である。図 11 はトルク制御特性の例であり、トルク指令に対し良好な軸トルク特性を示している。

(3) 圧延機への応用 適用例としては冷間圧延機がある。電動機定格は

4 P-4, 800 kW-230/1, 380 rpm-7.8/46.5 Hz-

1, 800/2, 435 V-1, 793/1, 405 A-OL 175%

など 5 台あり、変換器はサイリスタ素子定格 4 kV-1.5 kA を使用し、上記では 1 アーム 1 個の 72 アーム構成にて出力電圧 2,900 V, 定格電流 1,973 A である。

電源系統については設備の稼働条件と経済性も考慮してベース速度、80% 負荷にて総合力率を 80% にするよう機器の定格を選定した。

4. 終 り に

高性能大容量交流可変速駆動システムとしてサイリスタモータ、非循環電流サイクロコンバータ、循環電流サイクロコンバータについて機器構成、特長、最近の制御技術と圧延主機への応用例を述べた。この三機種の開発によってあらゆる種類の圧延機に対し交流可変速駆動システムが、要求性能と経済性を考慮しながら適用できるようになった。今後もっと広い分野にてこれら交流機駆動システムが多く採用されるようになるであろうと期待している。本論文が交流システムの適用に際し方式選定の参考になれば幸いである。

(昭和 61 年 8 月 6 日受付)

文 献

- (1) 電気学会調査専門委員会：「製鉄工業における新可変駆動システムの現状と動向」，電学技報，(II部)，No. 211 (昭 60-11)
- (2) 電気学会調査専門委員会：「ドライブエレクトロニクスの最近の技術動向」，同上，(II部)，No. 186 (昭 60-4)
- (3) 電気学会調査専門委員会：「交流可変速駆動方式の技術動向」，同上，(II部)，No. 109 (昭 56-4)
- (4) 平田，他：「サイリスタモータとその応用」，東芝レビュー，39，1022 (昭 59-11)
- (5) 羽片，他：「サイクロコンバータとその応用」，同上，39，1027 (昭 59-11)
- (6) 片山，他：「住友金属工業(株)鹿島製鉄所の厚板仕上主機用 15000 kW 交流可変速システム」，同上，40，987 (昭 60-11)
- (7) 西條，他：「循環電流によるサイクロコンバータの無効電力補償」，電気学会半導体電力変換研資，SPC-80-18，21 (昭 55-7)
- (8) 多田隅，他：「非干渉制御理論を適用した循環電流制御法の検討」，電気学会半導体電力変換研資 SPC-83-15，31 (昭 58-6)